利用晶体拼接实现大口径会聚光束三倍频

王军华[1,2],程文雍[1],杨 菁[1],杨厚文[1,3],王晓倩[1,2]

(1. 山东大学 光学高等研究中心,山东 济南 250100;
2. 山东大学 信息科学与工程学院,山东 济南 250100;
3. 山东大学 晶体材料国家重点实验室,山东 济南 250100)

摘 要:惯性约束聚变激光驱动器中,熔石英透镜的紫外激光损伤问题一直是限制其负载能力提升的重要因素。对此提出了一种新的大口径光束三倍频构型方案,将三倍频晶体置于聚焦透镜之后,在基频光和倍频光的会聚过程中实现和频。大口径会聚光束的入射角度达 36.35 mrad,为满足相位匹配条件,三倍频晶体采用相位匹配接受角度更大、损伤阈值更高的 LBO 晶体。理论分析表明,3 块切割角度不同的 LBO 晶体拼接即可满足会聚光束相位匹配容忍角的要求。原理性实验也验证了该方案的可行性。该构型不仅能规避熔石英透镜的紫外激光辐照,提升激光驱动器的负载能力,而且能突破 LBO 晶体的口径受限问题。

关键词:惯性约束聚变; 晶体拼接; 会聚光束; 三倍频; 相位匹配
中图分类号:TN248.1 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.1206010

Frequency tripling of convergent beam with large diameter employing tiling crystals

Wang Junhua[1,2], Cheng Wenyong[1], Yang Jing[1], Yang Houwen[1,3], Wang Xiaoqian[1,2]

(1. Advanced Research Center for Optics, Shandong University, Jinan 250100, China;
2. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China;
3. State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: In inertial confinement fusion laser driver, ultraviolet laser damage of fused silica lens is an important limiting factor for lifting load capability of the laser driver. Considering the above reason, a new configuration of frequency tripling is proposed to solve this problem. The frequency tripling crystal is placed on the back of the focusing lens, thus the sum frequency generation of the fundamental frequency light and doubling frequency light occurs in the beam convergence path. Incident angle of the convergent beam is up to 36.35 mrad, thus the frequency tripling crystal must have a large acceptance angle for phase matching condition. LBO crystal which also has high damage threshold is employed as the frequency tripling crystal. Theoretical analysis indicates that three tiled LBO crystals with different cutting angles will meet the requirement of phase matching and principle experiments also supported this scheme. By employing this configuration, the fused silica lens will only be irradiated by fundamental frequency

收稿日期:2016-04-11; **修订日期**:2016-05-15
基金项目:山东大学基本科研业务费专项资金(2015JC043);济南市高校院所自主创新计划(201302007)
作者简介:王军华(1990-),男,硕士,主要从事高能量激光方面的研究。Email:guangxin092@126.com
通讯作者:程文雍(1981-),男,副教授,硕士生导师,博士,主要从事激光技术方面的研究。Email:cwy@sdu.edu.cn

light and doubling frequency light and its damage threshold will be improved, thus the load capability of the laser driver will be lifted. At the same time, the limitation of growth size with LBO crystal will be broke through.

Key words: inertial confinement fusion; crystal tiling; convergent beam; frequency tripling; phase matching

0 引 言

惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion,ICF)激光驱动器中，熔石英透镜的紫外激光损伤问题一直是限制其负载能力提升的重要因素[1]。抑制透镜损伤的方法通常是提升加工质量或通过激光预处理机制提高透镜的损伤阈值[2],但是提升幅度有限。文中提出了一种大口径光束三倍频(Frequency Tripling,FT)构型方案,将三倍频晶体置于聚焦透镜之后,聚焦透镜只经受基频光和倍频光辐照,相比于平行光束三倍频 (Parallel Beam Frequency Tripling, PBFT)紫外激光辐照,负载能力大幅提高;另外,聚焦透镜的材质也得以扩展,可以采用成本更低的 K9 玻璃代替熔石英。

该构型的关键问题是如何配置三倍频晶体。根据法国 Alisé 装置的实验数据，Ⅰ类 KDP/DKDP 晶体倍频与Ⅱ类 LBO 晶体三倍频的组合可以实现 80%的三倍频效率[3],因此文中提出的三倍频构型方案中，三倍频晶体采用损伤阈值和接受角度更大的 LBO 晶体。理论分析表明,按照 ICF 工程设计的 36 cm 光束口径，三块不同切割角度的 LBO 晶体拼接即可满足光束会聚后的相位匹配。原理性实验采用 9 mm 小口径光束,短焦距透镜聚焦,满足入射角相位匹配这一特征，利用三块切割角度不同的小口径 LBO 晶体拼接验证了该方案的可行性。该构型不仅能规避聚焦透镜的紫外激光辐照，提高 ICF 激光驱动器的负载能力,而且能突破 LBO 晶体的口径受限问题。

1 理论分析

利用晶体拼接实现大口径会聚光束三倍频(Convergent Beam Frequency Tripling, CBFT)的基本构型如图 1 所示。口径为 a 的基频光束通过Ⅰ类相位匹配的 KDP/DKDP 晶体倍频,倍频光和剩余的基频光经聚焦透镜聚焦，在光束会聚过程中通过Ⅱ类相位匹配的拼接 LBO 晶体和频产生紫外激光。聚焦透镜的后截距为 L,最边缘光线的入射角度为 θ_m。

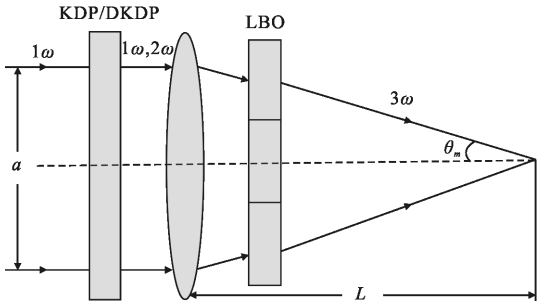

图 1 利用晶体拼接实现大口径会聚光束三倍频示意图

Fig.1 Schematic of tiling crystals employed for frequency tripling of convergent beam with large diameter

限制条件如下：

(1) 聚焦光束的功率密度须小于 LBO 晶体的损伤阈值

法国 Alisé 装置上的实验表明,LBO 晶体表面的损伤阈值为 10 J/cm^2、6 ns@351 nm,体损伤阈值为 16 J/cm^2、5 ns@355 nm[4]。根据损伤阈值与脉冲宽度的对应关系[5],对应 3 ns 脉宽的损伤阈值分别为：$10\times\sqrt{3/6}\approx7.1$ J/cm^2 以及 $16\times\sqrt{3/5}\approx12.4$ J/cm^2。而根据 Coherent 公司生产的 LBO 晶体数据，损伤阈值(未提及表面还是体内)为19.8 J/cm^2、0.9 ns@355 nm，对应 3 ns 脉宽的损伤阈值为 $19.8\times\sqrt{3/0.9}\approx36.1$ J/cm^2。分析发现,二者数据差异较大,来源于晶体生长尺寸的差异,晶体尺寸越大,生长周期越长,缺陷越多,因此损伤阈值越低。在工程应用中,为防止聚焦产生的高能量密度激光损伤晶体，拼接的三倍频晶体应尽量靠近透镜放置。

(2) 尽量减小晶体的拼接块数

拼接块数越多，复杂度越高，工程实现难度越

大。20 世纪 80 年代，美国利弗莫尔实验室在其 NOVA 装置上已经实现过 3×3 块 KDP 晶体的拼接[6]，以适应其 74 cm 口径的光束尺寸。根据我国目前的 LBO 晶体生长情况，可以切出的胚片尺寸约为 15 cm×15 cm[7]，以 36 cm 口径的激光工程应用为例，单从尺寸上考虑，使用 3×3 数量的晶体拼接就可以满足光束的口径要求。

(3) 晶体接受角须大于光束入射角

光束聚焦的示意图如图 2 所示，从四个顶角入射到焦面处的光线为最边缘光线，其相对中轴光线的入射角度最大。设入射到透镜的基频光束口径为 a=36 cm，则四个顶角距透镜中心的距离为 $\sqrt{2a}/2$。设聚焦长度 L=700 cm，则最边缘光线的入射角 $\theta_m=\arctan[(\sqrt{2a}/2)/L]$=36.35 mrad。

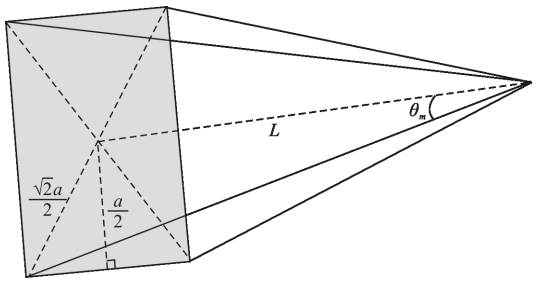

图 2 方形口径光束聚焦示意图

Fig.2 Schematic of convergent beam with square aperture

三倍频晶体的相位匹配接受角是一个关键参数。晶体接受角度越大，所需晶体块数就越少。LBO 晶体Ⅱ类相位匹配产生紫外激光的接受角为 3.5 mrad·cm。根据折射定律，光束入射晶体前后与中轴夹角如图 3 所示。设晶体厚度为 L_{lbo}，则在晶体厚度范围内，容忍角度为 $\Delta\theta=3.5/L_{lbo}$mrad。在 ICF 激光驱动器中，计算表明，能量密度达到 1.5 GW/cm^2 时，无论采用何种匹配方式，利用 KDP 晶体至少需 14 mm 厚，而 LBO 晶体只需 4 mm 厚[8]。那么，容忍角 $\Delta\theta$=3.5/0.4=8.75 mrad。

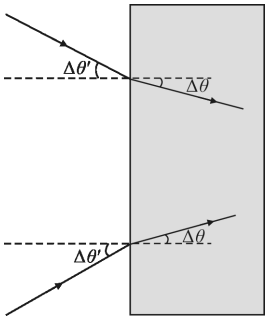

图 3 光束入射晶体前后角度示意图

Fig.3 Schematic of the incident beam angles out and in the crystal

晶体厚度减小，随之而来的是加工难度和夹持难度的增加，但优势也十分明显，如重量大大减轻、晶体切割片数成倍增加等。根据法国 Cristal Laser 公司和美国 Coherent 公司的数据，LBO 晶体的莫氏硬度分别为 5.5 和 6，KDP 类晶体的莫氏硬度为 2.5[9]，且 LBO 晶体不易潮解，LBO 晶体变薄对加工压力不大。

入射晶体前的最大容忍角度：

$$\Delta\theta'=\arcsin[n\cdot\sin(\Delta\theta/L_{lbo})]\approx n\cdot\Delta\theta/L_{lbo}=14.0\ \text{mrad}$$

其中，根据美国 Coherent 公司数据，n 的平均值为 1.60。

考虑靶面光斑尺寸对发散角的影响。设靶面聚焦光斑尺寸 δ=400 μm，那么，$\theta_m=\arctan[\sqrt{2}(a-\delta)/(2L)]$=36.3 mrad。减小 0.05 mrad，靶面光斑相比会聚前光束和焦距有 3~4 个数量级差距，对入射角度影响极小，因此可忽略焦面光斑尺寸的影响。

考虑聚焦透镜厚度，透镜后截距(透镜后表面到焦面距离)为 7 m，按照美国 NIF 的设计，其楔形透镜厚度仅为 4.6 cm，所以透镜厚度的影响也可以忽略。

假设一块晶体倾斜于透镜主光轴放置，垂直于聚焦光线中的一根在以其为对称轴的圆锥内，光线与其夹角小于 14.0 mrad 即可满足相位匹配条件。考虑 LBO 晶体晶轴为直线，以及角度相位匹配的切割特性，晶体必须切成平片，则与透镜中心光轴垂直的晶体应为上述圆形的内接正方形，如图 4 所示。在此正方形内，光线入射角度变化范围仍为 0~$\Delta\theta'$，其中 $\Delta\theta'$=14.0 mrad，而在其中心到直边的垂直距离内，角度变化范围为 0~$\Delta\theta''$，其中 $\Delta\theta''=14/\sqrt{2}$ mrad。

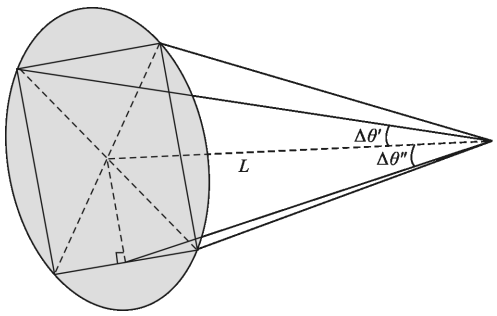

图 4 单块晶体光束入射角度示意图

Fig.4 Schematic of beam incidence angle from a single crystal

因此在这一条线上需要晶体块数为 N_1=arctan[(a/2)/L]/$\Delta\theta'\approx$3 块，则总共需要晶体数量为 3×3=9 块。36 cm 光束口径所需单块晶体最小尺寸为 a_{1min}=12 cm，根据图 4 中的几何关系，单块晶体最大允许尺寸a_{1min}=2×tan($\Delta\theta''$)×$L\approx$13.8 cm。目前的 LBO 晶体 15 cm 的生长尺寸已经可以满足。如此数量和尺寸的晶体拼接在工程难度和造价上都可实现。

2 晶体拼接方案

单块晶体的切割方向如图 5 所示。采用Ⅱ类相位匹配切割方向，θ=44.7°，φ=90°，温度 20 ℃(基频光波长 1 053 nm)。

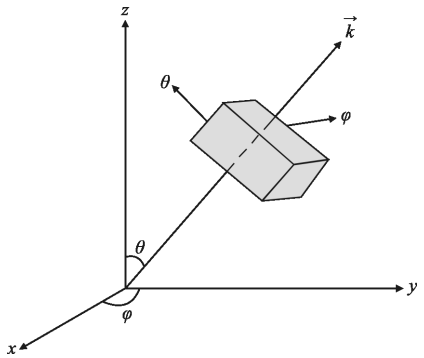

图 5 LBO 晶体切割方向示意图

Fig.5 Schematic of cut direction for LBO crystal

美国 NOVA 装置的晶体拼接是直接用夹持件把 3×3 块 KDP 晶体紧固在一起，9 块 KDP 完全相同，角度一致。针对 CBFT 的晶体拼接，如果 9 块LBO 晶体切割方向完全相同，在拼接时互相之间就必须有一定夹角，相邻两块晶体夹角为 180°−2θ_m/3=178.61°，在夹持时受力方向不同，夹持难度变大。因此，在应用中可设计成切割角度略有不同，如图 6 所示。考虑到图中入射晶体前后的角度差异，切割角度只需要有 arcsin[sin(180°−178.61°)/n]=0.87°差异，这并不会明显影响入射光束，同时满足了相位匹配条件和晶体拼接的工程可实现性。晶体厚度均为4 mm，通光面尺寸分别为：A_1、C_1 为边长 13.1 cm 正方形；A_2、C_2 为 θ 方向 13.1 cm，φ 方向 13.8 cm；B_1 为 θ 方向 13.8 cm，φ 方向 13.1 cm；B_2 为边长 13.8 cm 正方形。

LBO 晶体在 φ 方向的容忍角为 100 mrad 以上，所以晶体在 φ 方向为相同的角度和尺寸，拼接原因是受到晶体生长尺寸的限制。将来晶体尺寸满足光束口径要求后，φ 方向完全可以采用一块晶体。拼接晶体口径为 40 cm，中心处晶体尺寸为最大允许尺寸 13.8 cm，以减小晶体拼接带来的不利影响。

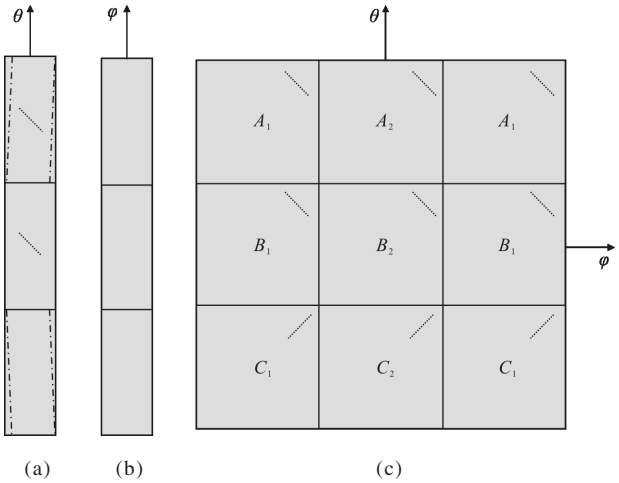

图 6 LBO 晶体拼接示意图(晶体内虚线表示光轴方向，点画线为晶体都按相同角度切割时的拼接方向) (a)拼接晶体垂直 θ 方向侧视图；(b)拼接晶体垂直 φ 方向侧视图；(c)拼接晶体正视图

Fig.6 Schematic of tiling LBO crystals (dotted line shows the direction of optical axis, dash-dot line shows the cutting direction of the crystal with the same cutting angle) (a) Side view of vertical to direction of θ; (b) Side view of vertical to direction of φ; (c) Front view of the tiling crystals

3 验证实验及分析

利用拼接 LBO 晶体实现大口径会聚光束三倍频的原理性实验结构如图 7 所示，将虚线框内的结构(a)与(b)分别置于结构(c)所在光路上，三种不同的实验结构可对比光束会聚过程中单块 LBO 晶体与拼接 LBO 晶体的三倍频效果以及会聚光束与平行光束的三倍频效果。基频光（波长 1 064 nm)由 Continuum 公司 Powerlite DLS 8000 激光器产生，通过调整放大器的延迟时间(Amplifier Delay Time)，基频光的最高输出能量为 1 J，光斑直径为 9 mm，脉冲宽度 6~8 ns。倍频晶体采用激光器内置的 DKDP 晶体，三倍频晶体采用拼接的三块 LBO 晶体，如图 7(a)所示；同时利用一块与拼接晶体尺寸相同的单块 LBO 晶体进行对比实验，如图 7(b)、(c)所示。M2 和 M3 为表面镀有 1 064 nm、532 nm 45°增透膜，355 nm

45°高反膜的平面镜，平凸聚焦透镜 M1 的焦距为 215 mm，镀有 1 064 nm、532 nm 增透膜。

三倍频 LBO 晶体采用Ⅱ类相位匹配，晶体在通光方向上的厚度为 8 mm。最边缘光线的入射角度为 θ_{max}=arctan[(9/2)/215]=20.93 mard，晶体的最大容忍角度为 $\Delta\theta_{max}=n\times3.5/0.8=7$ mard，则拼接晶体在 θ 方向上满足相位匹配条件需要 20.93/7≈3 块，考虑到 LBO 晶体对 φ 角不敏感，晶体拼接采用 1×3 的方案，切割角度及尺寸如图 7(a)所示。晶体之间的接触面抛光，以减少能量损失；拼接部位不倒角，防止形成缺口。晶体拼接时，将三块晶体依次放入二维柱面透镜调整架，通过夹持件调整三块晶体的角度致紫外激光的输出能量最高。

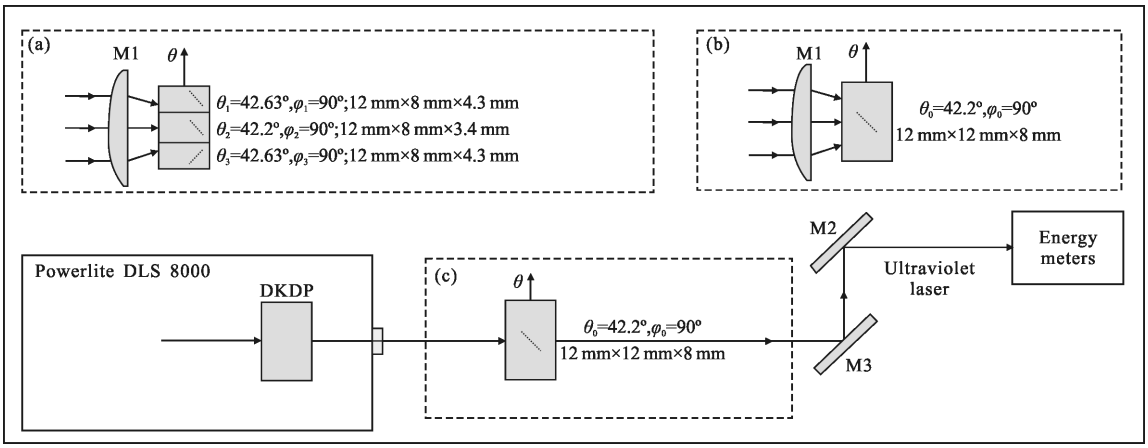

图 7 利用 LBO 晶体拼接实现大口径会聚光束三倍频原理性实验结构图(晶体内虚线表示光轴方向)
(a)三块拼接 LBO 晶体实现会聚光束三倍频；(b)单块 LBO 晶体实现会聚光束三倍频；
(c)单块 LBO 晶体实现平行光束三倍频

Fig.7 Schematic of principle experiment with tiling LBO crystals employed for convergent beam frequency tripling (the dotted line shows the direction of optical axis) (a)Convergent beam frequency tripling employing three tiling LBO crystals(b)Convergent beam frequency tripling employing one LBO crystal; (c)Parallel beam frequency tripling employing one LBO crystal

经 M2 和 M3 两平面镜滤除剩余的基频光和倍频光，紫外激光的能量采用 OPHIR 公司的 PE50BF-DIF 能量探头测量，将其置于聚焦透镜的焦点之前，以减少测量误差，实验结果如 8 所示。

由图 8 中(a)、(b)可知，会聚光束实现三倍频时，拼接晶体的效果要优于同尺寸的单块 LBO 晶体，因为单块 LBO 晶体 θ_0=42.2°的切割方向只有在平行光束入射时才能满足相位匹配条件，而三块拼接晶体之间 0.43°的切割角度差异可以满足 20.93 mrad 入射角的相位匹配要求。由图 8 中的(a)、(c)可知，利用晶体拼接在会聚光路上进行三倍频与同尺寸的单块晶体直接进行平行光三倍频相比，两者的转换效率差距较大，前者的最高输出能量仅为后者的 40%，原因主要有以下几点：第一，晶体夹持件的精度及调节维数不足，若每块晶体的角度均可自由调节，能进一步满足相位匹配的要求；第二，拼接晶体的尺寸较小，±0.1°的加工误差相对较大；第三，晶体之间的拼接缝隙对激光能量的损耗在一定程度上限制了三倍频效率；第四，实验中三倍频晶体采用的是 1×3 拼接方案，在保证加工质量和拼接质量的前提下，若采用 1×5 或 1×7 的拼接方案，单块晶体承受的光束入射角度可进一步减小，三倍频效率仍有上升空间。

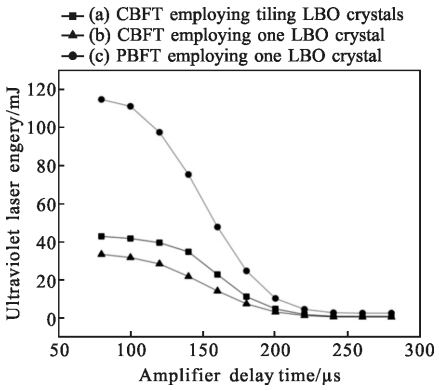

图 8 不同放大器延迟时间下的紫外激光输出能量

Fig.8 Ultraviolet laser energy for different amplifier delay time

4 结 论

文中提出了一种大口径光束三倍频构型方案，理论分析和原理性实验都表明利用晶体拼接实现大口径会聚光束三倍频的可行性。尽管实验中利用三块拼接 LBO 晶体实现会聚光束三倍频的转换效率还不够理想，但通过提高晶体的加工精度、改进晶体的角度调节方法等可进一步提高三倍频的转换效率。下一步还应考虑会聚光束三倍频方案在 ICF 实际工程应用中的相关问题。该构型不仅可以实现会聚光束的相位匹配，有效地规避熔石英透镜的紫外激光损伤，而且能突破聚焦透镜材料和三倍频晶体的限制，拓宽 ICF 工程应用的主材选择范围。

参考文献：

[1] Feng Bo, Liu Bingguo, Chen Fengdong, et al. Final optics damage online inspection system for ICF [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(9): 2519-2524. (in Chinese)
冯博, 刘炳国, 陈凤东, 等. ICF 终端光学元件损伤在线监测装置的研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2519-2524.

[2] Liu Hongjie, Ye Xin, Zhou Xinda, et al. Subsurface defects characterization and laser damage performance of fused silica optics during HF-etched process[J]. ***Optical Materials***, 2014, 36: 855-860.

[3] Mennerat G. Frequency tripling for next generation high energy lasers [J]. ***Advanced Solid-State Photonics, Optical Society of America***, 2011: AWA27.

[4] Wagner F R, Hildenbrand A, Natoli1 J Y, et al. Laser damage resistance of $RbTiOPO_4$: evidence of polarization dependent anisotropy[J]. ***Opt Express***, 2010, 15(21): 13849-13857.

[5] Smith W L, Bechtel J H, Bloembergen N. Dielectric-breakdown threshold and nonlinear-refractive-index measurements with picosecond laser pulses [J]. ***Physical Review B***, 1975, 12(2): 706.

[6] Campbell E M, Hunt J T, Bliss E S, et al. Nova experimental facility (invited)[J]. ***Rev Sci Instrum***, 1986, 57(8): 2101-2106.

[7] Hu Z. Development of large-size LBO crystal growth [C]// JSAP-OSA Joint Symposia. Optical Society of America, 2013: 18a_D5_4.

[8] Zhu Baoqiang, Qian Liejia, Zhang Zhuhong, et al. Basic properties of LBO related to high efficiency frequency conversion of broadband laser [J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 1995, 7(1): 95-100. (in Chinese)
朱宝强, 钱列加, 张筑虹, 等. LBO 晶体用于宽带激光调谐波转换的基本特性 [J]. 强激光与粒子束, 1995, 7(1): 95-100.

[9] Nikogosyan D N. Nonlinear Optical Crystal: a Complete Survey [M]. New York: Springer Press, 2005.